



Digitale Bibliothek Braunschweig
Publikationsserver der TU Braunschweig

Autor: Rolf Kloss

Titel: Planung landwirtschaftlicher Biogasanlagen nach technisch-wirtschaftlichen Kriterien

Planning of biogas plants in agriculture with regard to technical and economical regard

Institut: Institut für Technologie, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, 1986/87

Elektronisch veröffentlicht am: 09.05.2012

url: <http://www.digibib.tu-braunschweig.de/?docid=00043071>

Ursprünglich erschienen in:

Energy & Agriculture, 2nd International Conference, 13. – 16. October 1986, Brescia, Italien. Proceedings Vol 1, S. 148-161, 1987, Centro Stampa A.S.M. Brescia, Italien

PLANUNG LANDWIRTSCHAFTLICHER BIOGASANLAGEN
NACH TECHNISCH-WIRTSCHAFTLICHEN KRITERIEN

(PLANNING OF BIOGAS PLANTS IN AGRICULTURE
WITH REGARD TO
TECHNICAL AND ECONOMICAL ASPECTS)

R. Kloss *)
Institut für Technologie
der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
Braunschweig, BR Deutschland

Abstract

For the planning of a biogas plant which is adapted from a technological and economical point of view in the best way possible to the respective operational conditions, it is necessary to have, alongside a distinct planning strategy, a compendium and a calculation model. Because the latter both were not available up to now, a compendium was established on the basis of literature data and own experiments and a calculation model was developed using the net present value method. As a result of model observations and of use in practice, the suitability of the compendium and the calculation model could be proven and new knowledge showing the way ahead could be gained. An extension of the application of the model to neighbouring areas, such as for example to the area of the planning of plants for anaerobic treatment of sewage sludge or highly concentrated industrial refuse is, in the light of the similar questions arising, possible /1/.

1. Einleitung

Im Gegensatz zur Abwassertechnik, wo das bei der Faulung des Kommunalschlammes anfallende Methan als nützlicher Nebeneffekt der Faulung angesehen wird, steht bei der

*) jetzt: Institut für Siedlungswasserwirtschaft
und Abfalltechnik der Universität Hannover,
Hannover, BR Deutschland

Methangewinnung aus tierischen Exkrementen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen in erster Linie die Energiegewinnung im Vordergrund. Daneben kann je nach Anlagenstandort der Verfahrenseffekt der Dungverbesserung oder der Geruchsminderung und -umstimmung von Bedeutung sein. Wie eine Überprüfung der derzeit in der Bundesrepublik Deutschland betriebenen Anlagen /2/ zeigte, arbeiten im Hinblick auf die Energieeinsparung die meisten dieser Anlagen unwirtschaftlich. Die Ursache liegt im wesentlichen darin, daß wichtige Planungsentscheidungen - mangels besseren Wissens - rein intuitiv getroffen wurden. Neuere betriebswirtschaftliche Untersuchungen räumen der Biogastechnologie unter bestimmten Voraussetzungen ein breites Einsatzfeld ein. Es ist daher erforderlich, Biogasanlagen so zu planen, daß sie in technisch-wirtschaftlicher Hinsicht an die jeweiligen Betriebsbedingungen optimal angepaßt sind.

2. Planungsmethode

Elementare Bestandteile einer Biogasanlage sind der Reaktor, der Gasspeicher und die Einrichtungen zur Gasverwertung (Bild 1).

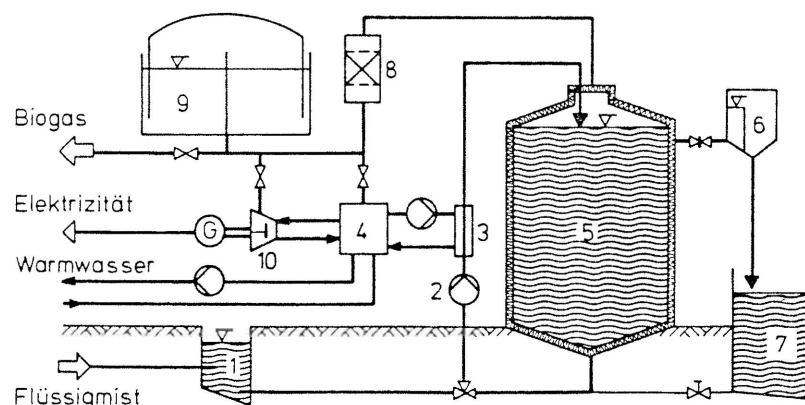


Bild 1: Bestandteile einer Biogasanlage sowie deren energetische und fluidmechanische Verknüpfung

1	Vorgrube	6	Überlaufwehr
2	Beschickungs- u.	7	Faulschlammspeicher
	Umwälzpumpe	8	Gasfilter
3	Wärmetauscher	9	Gasspeicher
4	Heißwasserbereiter	10	Wärme- kraft- u. -speicher
5	Reaktor (wärmege- dämmt)		kopplung

Bei der Planung einer Biogasanlage geht es im wesentlichen um die Auswahl und Bemessung dieser technischen Systeme. Der Planungsprozeß ist dabei als eine Folge von Entscheidungen zu verstehen, an deren Ende eine technisch-wirtschaftlich optimale Anlage steht. Dieses Ziel läßt sich durch eine methodische Vorgehensweise erreichen (Bild 2) /1/.

2.1 Planungsablauf

Der erste Schritt besteht in einer Voruntersuchung zur Ermittlung der verfügbaren Rohstoffarten zur Methangewinnung und deren zeitlichen und mengenmäßigen Anfalls sowie der zeitlichen Verteilung des Energiebedarfs, der im Betrieb durch Biogas abgedeckt werden soll.

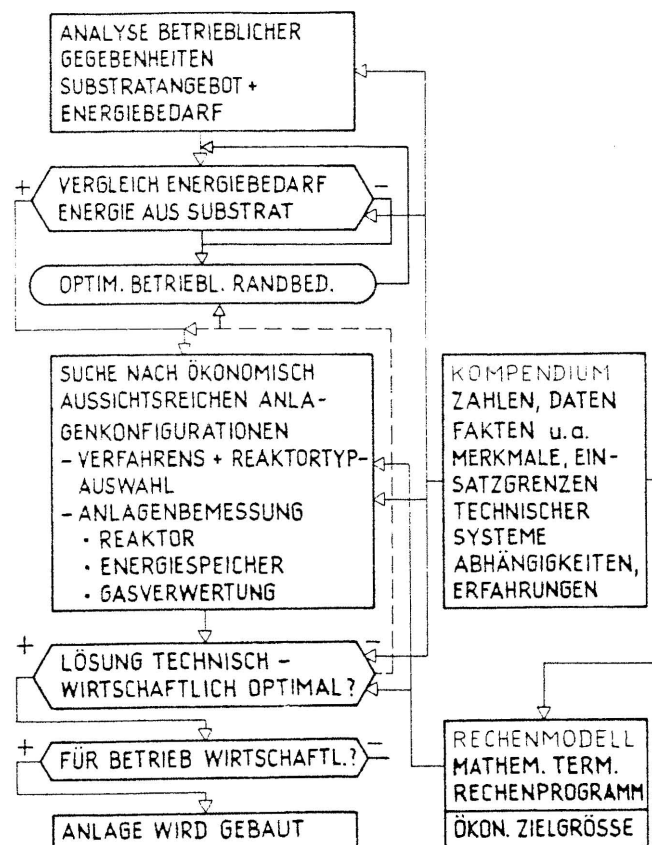


Bild 2: Vorgehensweise
bei der Planung einer Biogasanlage

Führt die Gegenüberstellung von Energiebedarf und potentiell bereitstellbarer Energie zu einem positiven Ergebnis, so kann die Planung der Biogasanlage beginnen. Andernfalls sind die betrieblichen Gegebenheiten möglichst in diesem Sinne zu verändern. Sollte dies nicht möglich sein, so muß bereits in diesem Stadium von dem Bau einer Biogasanlage abgesehen werden.

Bei positivem Ergebnis sind in einem weiteren Schritt auf iterativem Weg kostengünstige Anlagenkonfigurationen zu ermitteln, die den betrieblichen Anforderungen in technischer Sicht gerecht werden. Hierbei sind zur Auslegung der unterschiedlichen Anlagenkomponenten die nach dem Stand der Technik allgemein bekannten Bemessungsregeln anzuwenden. Erweist sich die gefundene Lösung als in technisch-wirtschaftlicher Hinsicht optimal, so ist in einem weiteren Schritt zu prüfen, ob diese Lösung auch für den landwirtschaftlichen Betrieb wirtschaftlich attraktiv ist. Ist dies der Fall, so kann mit dem Bau der Anlage begonnen werden.

2.2 Planungsmodell

Zur Durchführung der einzelnen Planungsschritte dienen ein Kompendium sowie ein auf einer ökonomischen Zielfunktion basierendes Rechenmodell.

2.2.1 Kompendium

Das Kompendium stellt eine Zusammenfassung dar von planungsrelevanten Zahlen und Fakten aus der Biogasverfahrenstechnik sowie aus daran angrenzenden Bereichen der landwirtschaftlichen Betriebswirtschaft und Technik entsprechend dem gegenwärtigen Stand des Wissens /1/. Es sollte u.a. enthalten:

- Aussagen über die zeitliche und mengenmäßige Verteilung des Substratanfalls sowie des Energiebedarfs (zum Beispiel für den Schritt der Analyse der betrieblichen Gegebenheiten);

- Angaben zur Größe der erzeugbaren Energiemengen bei der Vergärung (Faulung) der verschiedensten Arten landwirtschaftlicher Substrate, wie tierische Exkremente sowie pflanzliche Rest- und Abfallstoffe (für den Vergleich von Energiebedarf und Energieangebot);
- eine Beschreibung des Faulprozesses, des Verfahrens der Biogasgewinnung, der Verfahrensschritte, der technischen Systeme und Elemente einschließlich ihrer besonderen Merkmale und ihres Einsatzbereiches.

Daraus ergeben sich Hinweise zur Auswahl und Bemessung des Verfahrens unter verschiedenen Einsatzbedingungen (Wärme- oder kombinierte Elektrizitäts- und Wärmebereitstellung, Geruchsumstimmung und -minderung).

Für die Erstellung des Rechenmodells ist ferner die Kenntnis der Abhängigkeiten erforderlich, die zwischen den verschiedenen Größen bestehen, welche in das Verfahren eingehen. Auch müssen die Beträge dieser Größen oder ihr Wertebereich bekannt sein.

Da ein Nachschlagewerk, das die oben gestellten Anforderungen erfüllte, bislang nicht vorlag, wurde das erforderliche Material zunächst über eine Literatursammlung /3/ erfaßt, über einen Tesaurs geordnet und in Form eines Kompendiums planungsrelevanter verfahrens-, betriebstechnischer sowie ökonomischer Fakten nach vorheriger Auswertung zusammengefaßt. Ausgewertet wurden die in- und ausländische Literatur aus dem Bereich der Biogasverfahrenstechnik und aus angrenzenden Bereichen, wie zum Beispiel der Abwassertechnik, Mikrobiologie sowie der Heizungs- und Klimatechnik. Ferner wurden zu diesem Zweck am Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft eigene Versuche durchgeführt sowie - in Zusammenarbeit mit der Universität Braunschweig und der Fachhochschule Braunschweig-Wolfenbüttel - Studienarbeiten vergeben und betreut.

Von Interesse waren hierbei Fragen der

- Wärmerückgewinnung aus dem ausgefaulten Material,

- 6 -

- Durchmischung des Reaktorinhaltes bei der Vergärung von Rinderflüssigmist,
- Prozeßführung (einstufige oder zweistufige Faulung von Rinderflüssigmist
- Energiespeicherauslegung).

2.2.2 Rechenmodell

Mittels der im Kompendium zusammengestellten Informationen kann jedoch eine Auswahl und Bemessung technischer Elemente im Hinblick auf ein möglichst ökonomisch arbeitendes Verfahren nicht immer vorgenommen werden. Wegen der starken Vernetzung der Parameter, die die Bemessung einer Anlage beeinflussen, ist deren Auswirkung auf das ökonomische Optimum nicht ohne weiteres zu erfassen. Dies gelang jedoch durch den Einsatz eines Rechenmodells (Bild 3) /1/. Dieses Modell basiert auf der Kapitalwert-

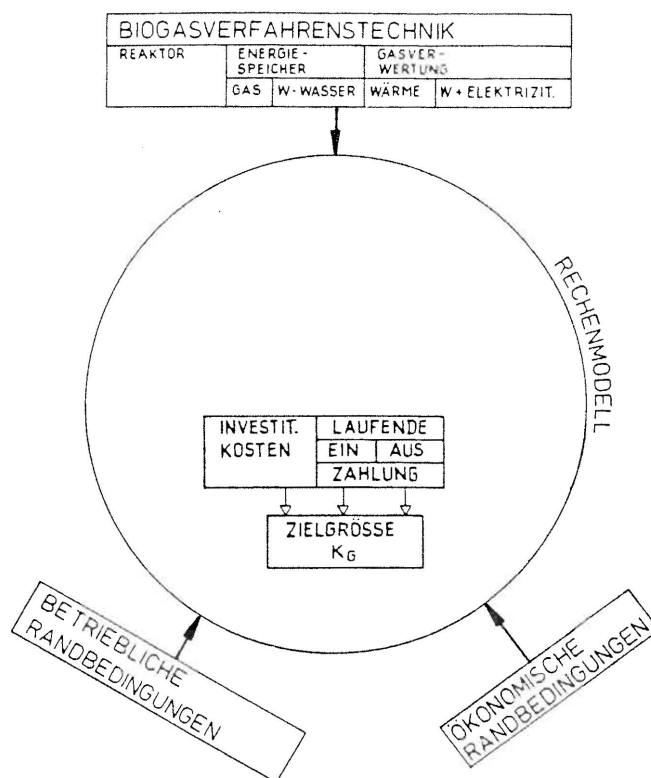


Bild 3: Darstellung des Planungsmodells, bestehend aus verfahrenstechnischen, betrieblichen und ökonomischen Rahmenbedingungen sowie dem Rechenmodell und dem auf der Kapitalwertmethode beruhenden Modellansatz

methode. Daraus ergibt sich als zu optimierende ökonomische Zielgröße der Kapitalwert K_G , der sich aus der Summe der während der Lebensdauer t_L einer Biogasanlage aufgezinsten Einnahmen und Ausgaben abzüglich der Erstinvestition errechnet. Bei der Bemessung ist das Optimum ermittelt, wenn K_G den größten Betrag aufweist.

2.3 Anwendung des Planungsmodelles

Eine entscheidende Bemessungsgröße einer Biogasanlage ist die Durchflußzeit t_R des Reaktors (Bild 4). Sie be-

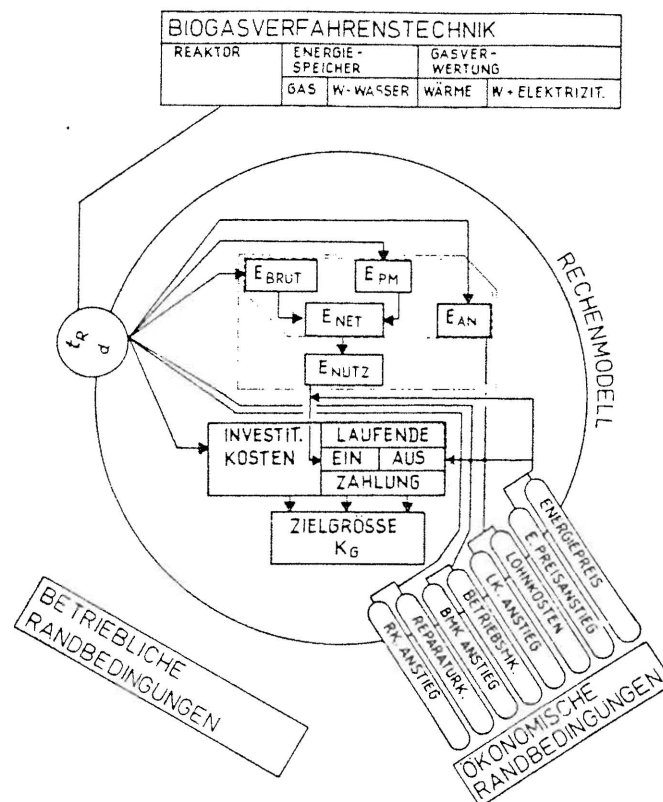


Bild 4: Wirkung des verfahrenstechnischen Parameters Durchflußzeit t_R auf verschiedene in das Rechenmodell eingehende (ökonomische) Größen sowie auf vom Rechenmodell beschriebene verfahrenstechnische Zusammenhänge (Energiebilanz)

einflußt über das Produkt mit der täglichen Zugabemenge \dot{V}_S direkt das Faulraumvolumen des Faulbehälters und ist somit bestimmend für den Investitionsbedarf des teuersten Elementes einer Biogasanlage.

Die Durchflußzeit bestimmt gemeinsam mit der Zugabemenge

das Faulraumvolumen und beeinflusst damit zusätzlich die Höhe der Kosten für Anlagenbedienung (im wesentlichen Lohnkosten) und Anlagenbetrieb (Stromkosten zum Betrieb der verschiedensten Antriebe, z.B. Rührwerke) sowie auch die Reparaturkosten.

Auf diese Weise bestimmt die Durchflußzeit neben der Erstinvestition auch die laufenden jährlichen Ausgaben. Auf der Einnahmenseite wirkt die Durchflußzeit über die Energiebilanz des Verfahrens auf den Kapitalwert K_G ein. Sie beeinflusst dabei indirekt die als Methan gewinnbare Bruttoenergieausbeute E_{BRUT} sowie den Prozeßmethanbedarf E_{PM} zum Aufheizen des Frischsubstrates auf Prozeßtemperatur und zum Ausgleich der Behälterabstrahlungsverluste. Diese beiden Größen bestimmen ihrerseits über die täglich erzeugbare Nettoenergie E_{NET} die täglich im Betrieb nutzbare Energiemenge E_{NUTZ} und damit die jährlichen Einsparungen des Betriebes an konventionellen Energieträgern. Dieser Betrag kann der Biogasanlage auf der Einnahmenseite zugerechnet werden.

Die Untersuchung des Einflusses der Durchflußzeit auf den Kapitalwert erfordert nicht nur die Kenntnis und Beschreibung ökonomischer Zusammenhänge, sondern auch die Aufdeckung physikalischer Gesetzmäßigkeiten (Beschreibung der Energiebilanzen sowohl des Reaktors als auch der Biogasanlage). Eine Auswahl aus den dabei zu berücksichtigenden wesentlichen Einflußgrößen sowie einen Teil der zwischen diesen Größen bestehenden Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zeigt Bild 5. In expliziter Schreibweise ergibt sich dabei für die Bewertung des Biogasverfahrens zur reinen Wärmebereitstellung ein mathematischer Term mit etwa 30 und zur kombinierten Elektrizitäts- und Wärmebereitstellung etwa 40 Einflußgrößen. Sollen auch Verfahrenseffekte wie die Geruchsumstimmung und -minderung sowie eine gegebenenfalls bessere Düngewirkung mit berücksichtigt werden, so vergrößert sich dieser Term geringfügig (Tafel 1) /1/.

- 9 -

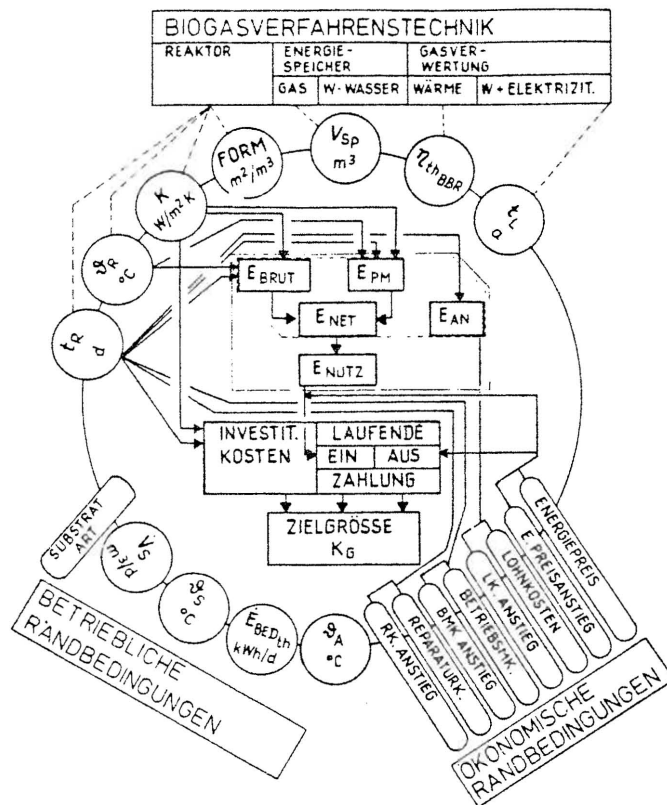


Bild 5: Darstellung der wichtigsten in das Planungsmodell eingehenden Größen:

- verfahrenstechnische Parameter:

Durchflußzeit t_R , Prozeßtemperatur ϑ_R , Wärmedurchgangszahl K der Wärmedämmung des Reaktors, Form des Reaktors (Zylinder, Kugel, etc.), Volumen V_{Sp} des Gasspeichers, thermischer Wirkungsgrad η_{thBGR} des Gasbrenners, durchschnittliche Lebensdauer t_L der Biogasanlage

- betriebliche Randbedingungen:

Substratart (Rind, Schwein, Huhn), täglicher Substratanfall \dot{V}_S (m^3/d), zeitlicher Verlauf des Bedarfs an thermischer Energie, zeitlicher Verlauf der durchschnittlichen Außentemperatur ϑ_A über das Jahr

- ökonomische Randbedingungen:

Energiepreis, Energiepreisanstieg, Lohnkosten, Lohnkostenanstieg, Betriebsmittelkosten, Betriebsmittelkostenanstieg, Reparaturkosten, Reparaturkostenanstieg

Tafel 1: Eingangsgrößen in das Rechenmodell zur Bestimmung des Kapitalwertes und des bezogenen Kapitalwertes

a) Gasverwertung zur reinen Wärmebereitstellung:

- Energiebedarf für Raumheizung über das Jahr nach Monaten geordnet
- Energiebedarf für Brauchwassererwärmung über das Jahr nach Monaten geordnet
- sonstiger Energiebedarf über das Jahr nach Monaten geordnet
- Kesselwirkungsgrad der zu ersetzenden Energieform
- Reaktorleistungskurve in Abhängigkeit von
 - . Substrat
 - . Reaktortyp
 - . Trockensubstanzgehalt
 - . theor. Verweilzeit
 - . tgl. bez. Bruttoleistung
- tgl. Zugabemenge
- Wirkungsgrad des Biogasheizkessels
- volumenbezogene Wärmekapazität des Frischsubstrates
- Prozeßtemperatur
- Frischsubstrattemperatur
- durchschnittliche Außentemperaturen nach Monaten geordnet
- Wärmedurchgangszahl
- Reaktorform: Kugel, Zylinder oder Quader sowie deren Kantenverhältnis
- tgl. Energieverluste durch Wärmeübertragung und Speicherung
- Investitionsbedarf für die Gesamtanlage
- Lebensdauer der Biogasanlage
- Preis einer substituierten Primärenergieeinheit
- jährliche Kostensteigerungsrate für thermische Energie (Heizöl)
- jährliche Kostensteigerungsrate für Betriebsmittelkosten
- jährliche Kostensteigerungsrate für Elektroenergie
- jährliche Kostensteigerungsrate für Lohnkosten zur Bedienung der Anlage

- jährliche Steigerungsrate der Anlagenreparaturkosten
- kalkulatorischer Zinsfuß
- Preis einer substituierten Elektronergieeinheit bei Zukauf
- tgl. zur eine Zugabemengeneinheit bez. Energiebedarf zum Betreiben der in einer Biogasanlage installierten Antriebe
- tgl. Zeitaufwand zur Anlagenbedienung
- Preis für eine Arbeitsstunde zur Anlagenbedienung
- Satz für die jährlich bei einer Biogasanlage anfallenden Reparaturkosten

b) Zusätzliche Größen bei Gasverwertung zur kombinierten Elektrizitäts- und Wärmebereitstellung:

- durchschnittlicher Elektrizitätsbedarf jeden Monats eines Jahres über den Tag nach Intervallen von zwei Stunden geordnet
- thermischer Wirkungsgrad des Gasmotor-Generator-Satzes
- elektrischer Wirkungsgrad d. Gasmotor-Generator-Satzes
- Investitionsbedarf für einen Gasmotor-Generator-Satz
- Beginn des Nachtstromtarifes
- Ende des Nachtstromtarifes
- Preis für eine Elektronergieeinheit zum Tagestarif
- Preis für eine Elektronergieeinheit zum Nachttarif
- Lebensdauer des Gasmotor-Generator-Satzes
- auf eine Betriebsstunde bez. Betriebskosten des Gasmotor-Generator-Satzes

c) Zusätzliche Größen bei Berücksichtigung weiterer Verfahrenswirkungen:

- auf die tgl. Zugabemenge bez. arbeitswirtschaftl. Nutzen
- auf die tgl. Zugabemenge bez. dungwirtschaftlicher Nutzen
- auf die tgl. Zugabemenge bez. Umwelt-Nutzen

Die Frage nach der optimalen Bemessung der Durchflußzeit wandelt sich somit also in eine Frage nach der optimalen Wertekonstellation für die Durchflußzeit und die übrigen Variablen.

Zur Lösung dieser Optimierungsaufgabe wurde folgende Vorgehensweise eingeschlagen:

- Überführung des mathematischen Terms in ein Rechenprogramm für einen Kleinrechner, der es erlaubt,
 - a) die Entscheidungsfindung durch Verkürzung der Rechenzeit zu beschleunigen und
 - b) vom Planer an einem beliebigen Arbeitsplatz eingesetzt zu werden.
- Einengung des Wertebereiches der Variablen auf jeweils einen Wert oder auf zwei Werte durch Beschränkung auf den jeweils oberen und unteren Grenzwert der im Kompendium beschriebenen Wertebereiche.
- Einführung von Modellbetrieben, die einen großen Teil der in der Praxis auftretenden potentiellen Planungsfälle mit hinreichender Genauigkeit wiedergeben (zum Beispiel ein 100 GV Schweinemast-, 100 GV Milchviehbetrieb).
- Untersuchung des Einflusses der verschiedensten Variablen auf den Kapitalwert durch iterative, rechnergestützte Bewertung im Hinblick auf eine weitere Termvereinfachung.
- Weitere Eingrenzung der Zahl der Variablen durch Verzicht auf als unbedeutend erkannte Größen oder durch Zuweisung eines festen Wertes.

Andere Lösungswege zur Optimierung der Zielfunktion wurden nicht beschränkt, da eine Optimierung mathematisch weder auf analytischem noch mit vertretbarem Aufwand auf rechentechnischem Weg durchgeführt werden kann. Der Einsatz dynamischer Optimierungsmethoden, zum Beispiel das Optimierungsprinzip von Bellmann /4/, führt zu unanschaulichen Resultaten und ist damit ebenfalls als Planungsinstrument wenig geeignet.

3. Ergebnisse, Folgerungen

Anhand der gewählten Vorgehensweise hat sich gezeigt, daß eine Optimierung der verschiedensten Bemessungsgrößen eines Reaktors unter beliebigen Randbedingungen möglich ist.

In gleicher Weise lassen sich aber auch andere in das Modell eingehende Bemessungsgrößen der Anlage, wie zum Beispiel die Größe des Energiespeichers sowie die Art der Gasverwertung, optimieren.

Diese Aussagen konnten durch praktischen Einsatz des Modelles im Rahmen von Gutachten weiter erhärtet werden. Ferner konnten, ausgehend von Modellbetrachtungen an einem Schweinemastbetrieb mit 100 GV sowie einem Milchviehbetrieb der gleichen Tierbestandsgröße unter Variation des Energiebedarfs, folgende zum Teil richtungsweisenden Aussagen erzielt werden:

- Der Reaktor einer Biogasanlage ist bei Betrieben der genannten Art und Größe nach den in Tafel 2 aufgeführten Daten zu bemessen.
- Die in Tafel 2 aufgeführten Bemessungshinweise sind unabhängig von
 - a) der Art der Gasverwertung,
 - b) dem Energiepreisanstieg.

Für andere Betriebsgrößen liegen die in Tafel 2 aufgeführten Werte für die ersten zwei Parameter ebenfalls im optimumsnahen Lösungsbereich, was zum Beispiel bedeutet,

Tafel 2: Allgemeine Bemessungshinweise zur Auslegung von Biogasanlagen zur anaeroben Behandlung von Schweine- und Rinderflüssigmist

		Schwein	Rind
- Prozeßtemperatur	° C	28 - 30	30 - 35
- Wärmedurchgangszahl	W/m ² .K	0,2-0,3	0,2-0,3
- Volumenbezogene Reaktoroberfläche	m ² /m ³	klein	klein
- Durchflußzeit	d	20 - 25	25 - 30
- Substratdurchsatz	m ³ /d	Gesamtanfall	Gesamtanfall

daß es weder sinnvoll ist, beheizte Anlagen im Niedertemperaturbereich bei 15° C (psychrophil) noch im thermophilen Bereich bei ca. 55° C zu betreiben.

Anders sieht die Situation bei den Parametern Durchflußzeit und Substratdurchsatz aus. Hier wird es im jeweiligen Planungsfall sinnvoll sein, ausgehend von den in Tafel 2 genannten optimumsnahen Parameterkonstellationen mit Hilfe des Rechenmodells iterativ das betriebsspezifische Optimum zu ermitteln.

Ferner ergeben sich aus den Betrachtungen im Hinblick auf einen möglichst wirtschaftlichen Anlagenbetrieb bestimmte Anforderungen an die betrieblichen Rahmenbedingungen. So sollte der Trockensubstanzgehalt von Schweineflüssigmist zwischen 6 und 9 %, von Rinderflüssigmist zwischen 8 und 12 % liegen und die Temperaturen des der Anlage zugeführten Schweineflüssigmistes 15° C, die des Rinderflüssigmistes 5° C übersteigen.

Eine Gasverwertung zur Elektrizitätsgewinnung ist nur in Sonderfällen sinnvoll.

Wird Gas zu reinen Wärmebereitstellungszwecken eingesetzt, so ist die Errichtung eines Energiespeichers aus wirtschaftlichen Gründen nicht zu empfehlen.

Hinweise zur Höhe der maximal zulässigen Investition für eine Biogasanlage können mit Hilfe einer modifizierten Form des Rechenmodells gegeben werden. Danach liegen die zulässigen auf den Reaktorinhalt bezogenen Investitionen einer beheizten Biogasanlage im allgemeinen bei ausschließlicher Verfeuerung des Gases zwischen 800 bis 900 DM pro m³. Im Einzelfall sind Abweichungen nach oben hin wirtschaftlich vertretbar. Dies erfordert jedoch eine genaue Untersuchung.

Literatur:

- /1/ Kloss, R.: Planung von Biogasanlagen nach technisch-wirtschaftlichen Kriterien: Stand des Wissens, Stand der Technik in der Landwirtschaft, Planungsmodell, mit Hinweisen für die Planung abwassertechnischer Anlagen.
Oldenbourg Verlag, München - Wien, 1986.
- /2/ Baader, W. und Kloss, R.: Assessment of Biogas Installations in the Federal Republic of Germany. Report to the IEC-Project Ref.No. ES-E-R-051-D (N), Braunschweig, 1982.
- /3/ Englert, G.; Kloss, R. und Heine, E.: Biogas Bibliographie
Zentrale Dokumentations- und Informationsstelle der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig, Juni 1985, 636 S., 4621 Nachweise.
- /4/ Gruhn, G. et al.: Optimierungsmethoden.
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1975.